水稻精準農業體系
由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量
35-42, 2003

由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量

張芳銘*、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: fming@wufeng.tari.gov.tw

摘要 -- 36
一、前言 -- 36
二、方法簡述 -- 37
三、結果與討論 --- 38
四、結語 -- 40
五、誌謝 -- 41
六、引用文獻 -- 41
ABSTRACT -- 42

由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量

張芳銘*、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: fming@wufeng.tari.gov.tw

摘要

本研究量測的水稻植被反射光譜具有一般綠色植物光譜曲線的類似特性，而不等量氮肥的施用將改變水稻的植被光譜曲線；稻株葉片及稈的含氮量百分比在生育期間的改變，無論一、二期稻作，均隨著生育的進展出現下降的趨勢。本研究發現，葉片氮素含量與稈氮素含量的相關強度曲線變化雷同，顯示各窄波段反射比對於葉片及稈的氮素含量具有相似的敏感反應，然而一期稻作與二期稻作的相關強度表現卻不一致。整體來說，一期稻作的反射光譜各窄波段反射比與氮素含量的相關性不高，相關係數介於-0.5 至 0.5 之間；二期稻作則在近紅外光區至中紅外光區具有較大的相關性，尤其在 1607 nm 窄波段位置的相關係數之絕對值最大，可獲得近 75%的變異估測準確度。經比較各種特徵波段之反射比值組合及光譜特徵與氮素含量的關係，發現仍以二期稻作才出現顯著相關，在 red edge slope 為二次曲線關係，在 red edge span/red edge location 則為一次直線關係。又根據研究結果，一、二期稻作均可利用多元線性複迴歸模式估測葉片及稈的氮素狀態，其中適用於一期稻作全生育期的植株葉片及稈氮素含量估測的最佳三元(403 nm、505 nm 及 710 nm)直線複迴歸模式決定係數(R^2)分別可達 0.734 及 0.717($P<0.0001$)，二期稻作相對的最佳三元(403 nm、558 nm 及 1607 nm)直線複迴歸模式決定係數則分別可達 0.814 及 0.812($P<0.0001$)。經比較這些三元直線複迴歸模式的估測值與實測值後，發現相關係數大於 0.93，顯示無論葉片或稈的氮素含量，模式估測可達近於 1：1 的驗證結果。

關鍵詞：光譜特徵、稻株氮素含量、植被反射比光譜、相關係數、多元直線複迴歸。

一、前言

眾所周知氮素是構成細胞原生質蛋白的主要成分之一，並為許多酵素的組成元素，參與維繫生存與生活功能的各項生理生化反應。植物在生長的過程當中，必須不斷的吸收與利用氮素來生成各種含氮化合物，推動代謝機制的進行，促使細胞持續的分裂、擴大與繁殖並組合成為組織、器官，再由營養生長轉進至生殖生長而代代生生循環不息，氮素的重要性不言可喻。

然而，當植體吸收蓄積了過量的氮素時，可能導致莖葉過度茂密因而影響透光係數，並使植體趨於柔弱纖細而易於受到病蟲源的危害。前者大幅增加的營養器官將增長能量的呼

吸消耗，破壞光合作用與呼吸作用的動態平衡，也使入射光源在植叢內快速衰減，限制了整體光合容量的發揮，以致於反而造成乾物質生成減少的後果及延遲植株的成熟（朱，1988；吳及林，1968；蔡及陳，1966）。後者係因吸收的過量氨離子降低了碳氮比，無法滿足植體內蛋白質合成所需的適當氮、碳比例，在醣類所形成的有機酸相對不足之下，使得多餘的氮素以氨基酸或醯氨形態儲積於植體內(湯及侯，1969)，在此情形極易受到病蟲源的侵襲(如稻株的稻熱病及二化螟蟲危害即是)，也可能帶來過多游離氨離子的毒害。另一方面，倘若植物缺乏氮素，將直接影響植株的生長與發育。以水稻言之，在有效分蘗期間氮素供應不足時，將因減少分蘗數而使穗數下降；在幼穗形成至孕穗期間欠缺氮素時，則減少穗軸分枝及每穗穎花數，嚴重影響生產潛力(朱，1988；吳及林，1968；蔡，1976)。

由於水稻是臺灣地區栽培面積最廣而產值最大的農作物，米食亦為民眾的傳統主食，如何實施精準的肥料管理，以適時適量的施用氮肥，仍為現行栽培水稻的重點課題。氮肥的精準管理不但可以提高稻作生產及施肥的經濟效益，更可以減少非點源污染，而具有維護生態環境的積極意義（李等，2002；Yang, 2001）。惟在水稻生育前期不易以目視方法判別稻株的氮營養狀況，即便以肉眼主觀的判斷決定施肥量，也難以依照稻株需求均勻合宜的施用於稻田中。本研究採用光譜遙測技術偵測近地面水稻族群植被高解析反射光譜，篩檢與稻株氮素含量相關的光譜特徵，以建立估測氮素含量的光譜特徵模式。

二、方法簡述

本研究於 2000-2002 年在臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場(24°02'N, 120°42'E, 海拔高度 85 m)進行田間試驗，參試水稻品種為臺農 67 號（*Oryza sativa* L. cv. TNG 67），計有 2000 年二期稻作、2001 年一期稻作、二期稻作及 2002 年一期稻作等四個期作。田區面積為 0.3 公頃，土壤屬於 Fluvaquentic Dystrochrept，酸鹼值為 pH 5.17，有機質含量為 1.22%。將田區劃分為六等份小區，每小區長 50 m、寬 10 m，由東往西依序施用 0、30、60、90、120 及 150 kg N ha^{-1} 等六種不等氮肥(硫銨)等級。各氮肥變級均分成三等份施用，於插秧後一週內施用 1/3 量當做基肥，插秧後 4(二期作)或 6(一期作)週施用 1/3 量當做第一次追肥，抽穗前三週施用剩餘的 1/3 當做第二次追肥(或稱穗肥)。試驗期間的水稻栽培方法採用慣行法，秧苗以南北座向機械插秧，每叢 3-5 株，行株距約為 0.30 m × 0.15 m，形成的族群密度約為 185,000 hills ha^{-1}。農藥施用視病蟲草害發生狀況而定，依前臺灣省政府農林廳出版之植物保護手冊(1994)推薦用藥及用量操作。

水稻植被光譜的量測係利用田間攜帶式高解析輻射光譜儀（spectroradiometer，model GER-2600, Geophysical & Environmental Research Crop., New York, USA）進行對反射光輻射的測定，量測波長範圍 330-2600 nm。光譜儀裝置 10 度視角(field-of-view)掃描鏡頭，分別與電池及手提電腦相接來操作。將光譜儀及各組件固定於距離水稻植被約 5.8 m 之高空作業車上垂直進行近地面量測，光譜測定圓周面積(目標區)約為 1 m 直徑。量測的光譜範圍各窄波段的光輻射值，配合已知反射光譜特性的參考白板('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, USA)光輻射資料計算出反射比光譜。每一氮肥處理區皆逢機量測 15 目標區，以平均值光譜曲線為代表，且將高解析光譜之各窄波段中心值取至個位數，又僅選用 350-2400 n m波長範圍的反射比光譜以去除光

譜兩端的硬體電磁干擾。光譜量測時間選擇在 10:00 至 13:00 時段的晴朗區間操作，以減少太陽入射角及雲遮的干擾，自插秧後 4-5 週起定期的量測光譜，以避免植被反射光譜受到土壤及灌溉水的影響。試驗統計分析係由 Statistical Analysis System version 8.1 軟體 (SAS 1998)及 SigmaPlot 2000 統計繪圖軟體 (SPSS ASC BV, The Netherlands)進行資料處理。

水稻植被高解析反射光譜之曲線光譜特徵波段之篩檢，係選取各代表曲線之綠光波段之最高反射比位置(GREEN)、紅光波段之最低反射比位置(RED)及近紅外光波段之最大反射比位置(NIR)，均為動態選取之特定波長位置。計算此三特徵波段反射比之相互比值、差值及和值，並以計算 NDVI($(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$)，以分析這些光譜指數與稻株葉片及稈(shoot, 莖+葉+葉鞘)氮素含量的關係。另篩檢介於 RED 與 NIR 之間的紅光臨界位置(red edge location)及反射比變動之紅光臨界區間(red edge span)，且計算紅光臨界之斜率(red edge slope)，以瞭解其等與氮素含量的關係。為篩檢水稻反射光譜範圍內之窄波段反射比與氮素含量相關性最大的波段位置，乃進行簡單直線相關強度分析（correlation intensity analysis），比較是否可作為估測稻株葉片或稈之氮素含量光譜特徵波段。再由相關強度分析所主觀選取的不同波段，篩檢出不同的轉折窄波段位置，以 SAS 統計軟體的共線性診斷 (collinearity diagnostics)、R^2 Selection methods 及逐步迴歸分析(step-wise regression analysis)選取若干與氮素含量有關的特徵窄波段，並由決定係數 (coefficient of determination or determining factor)的選定建立多元線性複迴歸模式。

氮素之化學分析係配合光譜量測及取樣調查，將樣株取回依各部位稱取鮮重後，經 70℃烘乾 72 小時後，磨碎篩濾（0.1 mm）粉狀樣本。以修正的 Kjeldahl 方法分析樣本全氮含量(李等，2002)。

三、結果與討論

作(植)物植被的色澤、組織結構、組成分及生理代謝的現況表現，將影響其反射光譜特性，而族群幾何構造及周遭環境隨著時空的變異，亦將反應在反射光譜質與量上的變化。一般綠色植物的健康植株，因為含有豐富的葉綠體(素)及其他色素（包括胡蘿蔔素、花青素及葉黃素等），因此在可見光區(400-700 nm 或 400-740 nm)有超過 80%的吸收率；由於色素與細胞壁在近紅外光區(740-1300 nm)幾乎不吸收，因此植被的反射光譜在近紅外光區會出現一個反射高峰區(Blackmer *et al.,* 1996; Gausman, 1982; Gausman *et al*., 1969; Sinclair, 1971)。又由於葉綠素 a 及葉綠素 b 的主要吸收峰是位於可見光區的藍光波段及紅光波段，分別以 450 nm 及 670 nm 為中心，所以植被約在 550 nm 附近會有較強的反射值(Arnon, 1949; 陳等，2001; 楊及蘇，1997)。本研究量測的水稻植被反射光譜具有以上所述綠色植物的類似現象(資料未列出)。

本研究亦發現，將不等量的氮肥施用於田間將改變水稻的植被光譜曲線(資料未列出)，高氮肥用量所促進的高植被覆蓋，使其在可見光區因高昂的光合作用而具有較低的反射比，而在近紅外光區則因複雜植叢的多重反射與折射作用而具有較高的反射比。文獻報告也顯示，缺乏氮素的作物植被在可見光區的反射會因為葉綠素濃度的降低而增加，在近紅外光區的反射卻因為葉片細胞層數的減少而降低，使得近紅外光波段的變化可作為作物植株氮素狀態的初步判斷(Baret and Guyot, 1991; Guyot, 1990; Hergert and Ferguson, 1997;

Milton *et al*., 1991; Sinclair, 1971)。本研究之稻株葉片及稈的含氮量百分比在生育期間的改變，無論一、二期稻作，均隨著生育的進展出現下降的趨勢(資料未列出)。顯示就稻株的單位重量而言，氮素含量隨株齡的增加而減少。生育前期可視爲發展營養器官(如葉、莖)的容積導致濃渡的減少，生育後期則分別有轉移至生殖器官(如穗)及老化組織枯萎掉落等可能性。

在量測的水稻植被光譜範圍內(350-2400 nm)，各窄波段之反射比與稻株葉片及稈的含氮量關係，可利用簡單直線相關強度分析，而得以初步瞭解稻株全生育期間各窄波段與氮素含量的相關強度。本研究發現，葉片氮素含量與稈氮素含量的相關強度曲線變化雷同(資料未列出)，顯示各窄波段反射比對於葉片及稈的氮素含量具有相似的敏感反應，然而一期稻作與二期稻作的相關強度表現卻不一致。整體來說，一期稻作的反射光譜各窄波段反射比與氮素含量的相關性不高，相關係數介於-0.5至 0.5 之間；二期稻作則在近紅外光區至中紅外光區具有較大的相關性，尤其在 1607 nm 窄波段位置的相關係數之絕對值最大。經將 1607 nm 窄波段位置的反射比與稻株葉片及稈的氮素含量關係予以繪圖，顯示水稻生育期間此一窄波段反射比與氮素含量適用於二次曲線關係(圖 1)，反射比愈高則氮素含量愈低，決定係數(R^2)在葉片及稈分別達到 0.763、0.745 (P<0.0001)。因此，若欲以單一窄波段反射比估測與追蹤二期稻作的植株氮素含量，可選取 1607 nm 窄波段，獲得近 75%的變異估測準確度。

由於綠色植物之植被對可見光區，尤其是紅光波段(640-740 nm)及藍光波段(425-490 nm)，具有較大的光輻射利用而形成較小的反射，而對近紅外光區(740-1300 nm)因受到細胞壁及細胞內氣體的反射形成較大的反射，本研究乃自水稻反射光譜曲線中動態篩檢出綠光波段峰點、紅光波段谷點及近紅外光波段頂點，作爲三項光譜曲線特徵波段，並由之劃分出紅光臨界區間(red edge span)、紅光臨界位置(red edge location)及紅光臨界斜率(red edge slope)等三項光譜特徵。經比較各種特徵波段之反射比值組合及光譜特徵與氮素含量的關係，發現仍以二期稻作才出現顯著相關，在 red edge slope 爲二次曲線關係，在 red edge span/red edge location 則爲一次直線關係(圖 2)。由於二次曲線明顯的在曲線高值臨界出現含氮量的飽和現象，不適用作爲對氮素含量的估測，建議以一次直線關係的 red edge span/red edge location 當做參數。一期稻作期間，各項特徵波段反射比組合及光譜特徵與氮素含量的關係並不高(資料未列出)，所以未予進一步分析及說明，未來加上更多年期資料後再予探討。

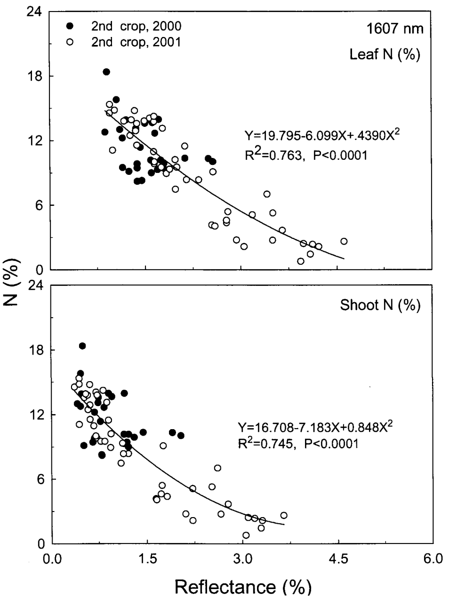

Fig. 1. Changes of nitrogen contents in leaves and shoots to spectral reflectance at 1607 nm for rice plants grown in the second cropping seasons of 2000 and 2001.

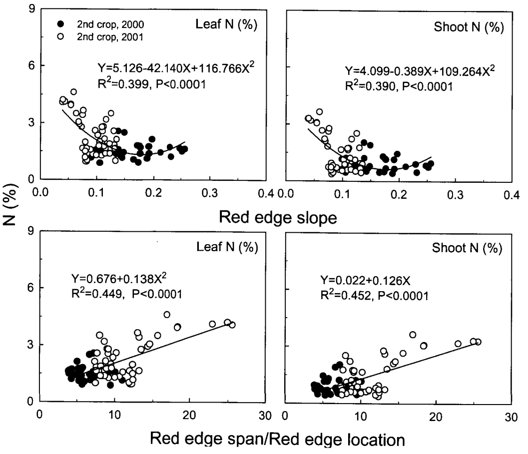

Fig. 2. Correlation between nitrogen contents in leaves and shoots and the red edge slope and red edge span/Red edge location for rice plants grown in the second cropping seasons of 2000 and 2001.

本研究再利用複迴歸分析方法，篩檢出更多的光譜特徵波段，期以組合複迴歸模式來提高對氮素含量的估測。經由 SAS 的共線性診斷(collinearity diagnostics)及逐步迴歸分析(step-wise regression analysis)步驟，篩檢出氮素含量有關之多個特徵窄波段，建立多元線性複迴歸模式。續由選取特徵窄波段數目所提高的模式決定係數，主觀的決定適合對稻株葉片及稈氮素含量的多元線性複迴歸模式。根據研究結果，一、二期稻作均可利用多元線性複迴歸模式估測葉片及稈的氮素狀態，其中適用於一期稻作全生育期的植株葉片及稈氮素含量估測的最佳三元(403 nm、505 nm 及 710 nm)直線複迴歸模式決定係數(R^2)分別可達 0.734 及 0.717($P<0.0001$)，二期稻作相對的最佳三元(403 nm、558 nm 及 1607 nm)直線複迴歸模式決定係數則分別可達 0.814 及 0.812($P<0.0001$)。經比較這些三元直線複迴歸模式的估測值與實測值後，發現相關係數大於 0.93，而預測的標準誤差值(SEP, standard error of prediction)小於 0.583(圖 3)。此顯示無論葉片或稈的氮素含量，模式估測可達近於 1：1 的驗證結果。

四、結語

由本文研究結果，顯示藉由簡單直線相關強度分析，可以篩檢出與稻株氮素含量相關性最高的光譜特徵波段。又由光譜指數及光譜特徵的分析與比較，可以找出適用的指數及光譜特徵。再藉由多元線性複迴歸模式，涵蓋多個特徵窄波段，確實增進了對稻株氮素狀態的估測準確度，也提高了利用於估測及追蹤稻株氮素狀態的可行性。如此結果，亦將使得利用光譜遙測模式從事稻株氮素含量及氮肥施用的精準管理更有機會加以落實。然而，為了增進對不同環境的適用性，建議宜增加更多環境條件的量測資料，並找出更適當的光譜特徵波段及數目，使建立的光譜遙測模式更能掌握氮素含量的變異。

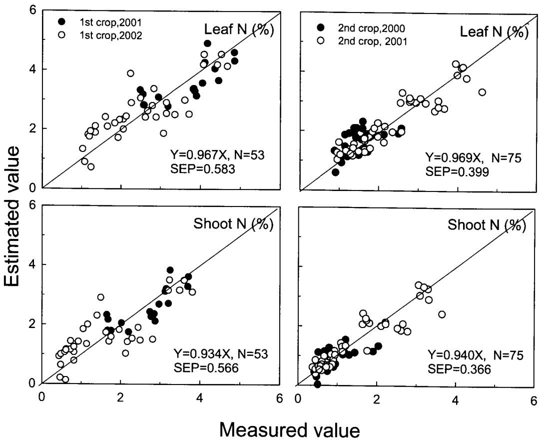

Fig. 3. Comparisons between the estimated values for the multiple linear regression models and the measured values of nitrogen contents in leaves and shoots for rice plants grown in the cropping seasons of 2000-2002.

五、誌謝

本研究承蒙行政院農業委員會農業試驗所經費(89 遙測-4.1-糧-41(Z), 90 農科-4.1.1-農-C2(Z), 91 農科-5.1.3-農-C2(Z), 92 農科-1.1.6-農 C1(Z))支持，謹藉以表示由衷感謝。

六、引用文獻

朱德民。1988。作物生產過程。國立中興大學，臺中市。

李裕娟、楊純明、張愛華。2002。施用氮肥對水稻植株氮素、葉綠素及植冠反射光譜之影響。中華農業研究 51（1）: 1-14。

吳育郎、林富雄。1968。水稻品種特性與肥料反應。科學農業 16（9-10）: 251-254。

陳榮坤、楊純明、張芳銘、蘇慕容。2001。水稻不同期作植被反射光譜之動態分析。中華農業氣象 8:77-92。

湯文通、侯愉。1969。水稻之生長原理（4）。科學農業 17（7,8）: 235-240。

楊純明、蘇慕容。1997。水稻族群植被反射光譜之分析。中華農業氣象 4（2）: 87-95。

蔡文福、陳炯崧。1966。水稻幼穗形成期及齊穗期施用氮肥對收量及其構成因素之影響。科學農業 14（1-2）: 53-54。

Arnon, D. I. 1949. Copper Enzymes in isolated chloroplasts : Polyphenoloxidases in *Beta vulgaris.* Plant Physiol. 24:1-15.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ. 35:161-173

Blackmer, A. M. 1988. Using precision farming technologies to improve management of soil and fertilizer nitrogen. Australian J. Agric. Sci. 49:555-564.

Gausman, H.W. 1982 Visible light reflectance and absorptance of differently pigmented cotton leaves. Remote Sens. Environ. 13:233-238.

Gausman, H. W., W.A. Allen, V.I. Myers and R. Cardenas. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hissutum* L. Agron. J. 61:374-376.

Guyot, G. 1990. Optical properties of vegetation canopies. p.19-43. *In:* Applications of Remote Sensing in Agriculture. Steven, M. D. and J.A. Clark, eds. Butterworth, London.

Hergert, G.W. and R.B. Ferguson. 1997. The impact of variable rate N application on N use efficiency of furrow irrigated Maize. p.297-305. *In*: Precision Agriculture. J.V. Stafford, ed., BIOS Scienttific Publishers Ltd., Oxford, U.K.

Milton, N. M., B.A. Eiswerth and C.M. Ager. 1991. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants. Remote Sens. Environ. 61:319-345.

Sinclair, T.R., R.M. Hoffer and M.M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. Agron. J. 63:864-868.

Yang, C.-M. 2001. Estimation of Leaf Nitrogen Content from Spectral Characteristics of Rice Canopy. Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection. Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. 14-18 October, 2001. Potomac, Maryland, USA. The ScientificWorld 1(S2). ISSN 1532-2246; DOI 10. 1100/tsw2001.387.

Using Hyperspectral Reflectance Data to Estimate Nitrogen in Rice Plants

Fan-Ming Chang* and Chwen-Ming Yang
Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail: fming@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

Results indicated that reflectance spectra of rice canopy were similar to other green-like plants. Applications of different amounts of nitrogen fertilizer changed the spectral patterns, but did not changed the decreasing trend of nitrogen contents in leaves and shoots of rice following plant development in both cropping seasons. Correlation intensity curve between spectral reflectance and nitrogen content in 340-2400 nm was similar in leaves and shoots, suggesting that responses of reflectance of rice spectrum to nitrogen contents in leaves and shoots were quite alike. However, the correlation intensity curve of First Crops was not conformed to that of Second Crops. In general, change of correlation coefficient was in between –0.5 and 0.5 in First Crops, yet the values were much higher in Second Crops. At 1607 nm for Second Crops, spectral reflectance may estimate more than 75% variability of nitrogen contents in leaves and shoots. Among the tested spectral indices and spectral characteristics, only red edge slope and red edge span/red edge location ratio had close correlation with nitrogen content in the second cropping season. The red edge slope was fitted to a quadratic function while red edge span/red edge location ratio was fitted to a linear function. Results also indicated that estimation of nitrogen content in leaves and shoots of rice plants may be improved by using multiple linear regression (MLR) models. The correlation coefficients for the relationships between the estimated and the measured values of nitrogen contents were greater than 0.93. The spectral wavebands suitable for the best-3 MLR models were 403 nm, 505 nm and 710 nm for First Crops and were 403 nm, 558 nm and 1607 nm for Second Crops, respectively.

Key words: Spectral characteristics, Nitrogen content in rice, Canopy reflectance spectrum, Correlation coefficient, Multiple linear regression.